

G. BARBERI - V. CIANCIO * - G. NERI **

Processi di dislocazione sismica nella litosfera siciliana

PREMESSA

La Fisica-Matematica fornisce le basi per la caratterizzazione dei processi di dislocazione sismica, mediante il calcolo dei parametri che definiscono l'orientazione (*strike*) e l'inclinazione (*dip*) della superficie di dislocazione, ed il versore di dislocazione (*rake*) delle porzioni di roccia a contatto sulla superficie stessa. Nella terminologia corrente l'insieme di tali parametri costituisce il meccanismo focale del terremoto.

Lo studio teorico della propagazione ondosa fornisce gli strumenti per la determinazione della funzione spostamento $u(r,t)$ in un generico punto A del mezzo circostante il processo di dislocazione, come conseguenza dello stesso processo. La definizione delle proprietà della funzione $u(r,t)$ (ovvero del sismogramma «atteso» nel punto A) costituisce la base teorica su cui si imposta la metodologia che consente il calcolo del meccanismo focale. Tale metodologia si avvale dei dati di polarità dei primi impulsi dell'onda P rilevati sperimentalmente al verificarsi del terremoto (Reasenberg ed Oppenheimer, 1985). Viene presentata e discussa in questo lavoro una applicazione ai dati sperimentali relativi ad un set di terremoti calabro-siciliani verificatisi tra il 1988 ed il 1991.

DATI E METODOLOGIA

I tempi d'arrivo delle onde P ed S generate dai terremoti calabro-siciliani, rilevati alle stazioni delle reti sismiche locali (Messina, Eolie, Etna, Calabria) ed I.N.G. (rete nazionale) operanti nella stessa area, sono stati utilizzati per il

* Dipartimento di Matematica, Università di Messina.

** Dipartimento della Materia, Geofisica e Fisica dell'Ambiente, Università di Messina.

calcolo degli ipocentri mediante il programma standard HYPO71PC (Lee e Valdes, 1985). È stato adottato il modello di velocità SOUTYR (Tab. 1) rivelatosi appropriato per la crosta calabro-siciliana nel corso di precedenti indagini (Neri et al., 1991 e 1995). In Tab. 1 è anche riportato il modello OTHERMOD, utilizzato parallelamente a SOUTYR allo scopo di valutare la dipendenza dei calcoli dalle incertezze intrinseche nella legge di propagazione; le differenze SOUTYR-OTHERMOD rappresentano le approssimazioni delle conoscenze disponibili sulle proprietà litosferiche nell'area in esame.

Come operazione preventiva al calcolo ipocentrale, si è proceduto ad una accurata attribuzione dei pesi per ciascun dato P ed S disponibile. Oltre a basare tale operazione su una valutazione della qualità delle letture sismografiche, si è provveduto alla estromissione dal calcolo ipocentrale di quelle stazioni che contribuivano, con la loro ubicazione, a rendere eccessivamente disomogenea la distribuzione dei sensori intorno all'area sorgente.

I calcoli dei meccanismi focali sono stati effettuati mediante il programma FPFIT (Resenberg e Oppenheimer, 1985), il quale utilizza le polarità dei primi impulsi P e ricerca, mediante una tecnica *a griglia*, i parametri angolari di *strike*, *dip* e *rake* capaci di fornire la migliore aderenza con le polarità sferimentali. Analogamente a quanto fatto per i calcoli ipocentrali, i meccanismi focali sono stati calcolati sia con il modello SOUTYR che con OTHERMOD.

RISULTATI

Un set di quasi cento eventi sismici è stato sottoposto al calcolo ipocentrale utilizzando entrambe i modelli suddetti. Ad elaborazione effettuata, sono stati selezionati gli eventi con profondità focale minore di 40 Km, registrati da almeno dieci stazioni, per i quali la deviazione standard sui residui temporali (RMS secondo la terminologia dei programmi HYPO) è risultata inferiore ad 1.0 sec., e gli errori statistici sull'epicentro (ERH) e sulla profondità (ERZ) non superavano 5 Km. Sono stati adottati ulteriori criteri selettivi, con particolare riferimento al massimo angolo di scopertura della rete sismica rispetto alla posizione dell'epicentro ($GAP < 180^\circ$), alla distanza tra gli epicentri ottenuti con i due diversi modelli ($\Delta\text{-EPI} < 5 \text{ Km}$) ed alla differenza tra le rispettive profondità ipocentrali ($D\text{-IPO} < 5 \text{ Km}$).

I terremoti così selezionati sono stati sottoposti al calcolo del meccanismo focale utilizzando i modelli SOUTYR e OTHERMOD. Si è analizzata l'incertezza sui risultati dell'elaborazione (parametri di faglia) facendo ricorso al file

d'output del programma FPFIT nel quale sono riportate tutte le orientazioni degli assi P e T compatibili con i dati di polarità dell'evento in questione. Si è inoltre analizzata la variabilità delle soluzioni focali in funzione del modello adottato.

Gli eventi che hanno superato queste ulteriori prove di *qualità* sono riportati in Tab. 2 (localizzazioni effettuate con il modello SOUTYR) ed in Tab. 3 (OTHERMOD). La distribuzione degli epicentri di tali eventi è riportata nelle Figure 1 e 2 per i rispettivi modelli, mentre le Figg. 3 e 4 propongono le sezioni verticali E-W e N-S. I valori dei parametri di faglia determinati per gli stessi eventi sono elencati nelle Tabelle 4 e 5, ed i corrispondenti plots stereografici delle soluzioni focali sono dati nelle Figg. 5 e 6.

COMMENTI E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Si può constatare dalle mappe epicentrali riportate nelle Figg. 1 e 2 che gli eventi sismici sono prevalentemente localizzati nell'area delle Isole Eolie e del Golfo di Patti, in corrispondenza dell'edificio vulcanico etneo ed in prossimità dello Stretto di Messina. In particolare, gli eventi eoliani si distribuiscono lungo una direttrice approssimativamente NW-SE, e questo risultato richiama l'importanza delle faglie denominate *Sisifo* e *Vulcano*, già identificate nel corso di precedenti indagini (v. ad es. Neri et al., 1991). Tali sistemi di faglia consentirebbero la dislocazione laterale di masse litosferiche tirreniche rispetto al blocco siciliano, nel contesto di un processo complessivo di migrazione verso SE, in direzione dell'Arco Calabro (Neri et al., 1995). Le sezioni verticali (Figg. 3 e 4) rivelano che gli eventi sono localizzati nei primi 30 Km e sono pertanto confinati alla crosta ed alle strutture mantelliche a ridosso della Moho.

I plots stereografici delle Figg. 5 e 6 mostrano un elevato grado di eterogeneità dei meccanismi, con particolare riferimento al settore delle Eolie e del Golfo di Patti. Ciò è compatibile con quanto precedentemente osservato relativamente ai periodi di attività meno intensa. Le fasi di sismicità più energetica sulle stesse faglie sono invece caratterizzate da meccanismi trascorrenti, in accordo con la suddetta dinamica di dislocazione laterale del blocco tirrenico rispetto al blocco siciliano.

I risultati ottenuti confermano pertanto le principali informazioni geodinamiche tratte da precedenti indagini e le rafforzano sulla base di un campione di dati accuratamente selezionato ed integrato rispetto al passato.

TAB. 1 - Modelli di velocità SOUTYR e OTHERMOD per le onde P. Le quantità v ed h rappresentano le velocità ed i livelli di profondità di partenza per i vari strati dei rispettivi modelli, e sono espresse in Km/sec e Km

| Modello di velocità SOUTYR | | Modello di velocità OTHERMOD | |
|----------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
| $v1 = 5.57$ | $h1 = 0.0$ | $v1 = 4.50$ | $h1 = 0.0$ |
| $v2 = 6.50$ | $h2 = 15.0$ | $v2 = 5.70$ | $h2 = 04.0$ |
| $v3 = 7.76$ | $h3 = 33.0$ | $v3 = 6.40$ | $h3 = 18.0$ |
| | | $v4 = 7.80$ | $h4 = 30.0$ |

TAB. 2 - Parametri ipocentrali determinati utilizzando il modello SOUTYR. Per ciascun evento vengono riportati, nell'ordine, la data, il tempo origine, la latitudine e la longitudine epicentrale, la profondità focale, il numero totale di tempi P ed S utilizzati, il massimo angolo di scoperta azimutale della rete intorno all'epicentro, la minima distanza epicentro-stazione, la deviazione standard sui residui temporali, l'errore statistico sull'epicentro e sulla profondità, ed infine la qualità della localizzazione secondo lo standard HYPO (Lee e Valdes, 1985).

| DATE | ORIGIN | LAT N | LATE | DEPTH | NO | GAP | DMIN | RMS | ERH | ERZ | QM |
|--------|-------------|----------|----------|-------|----|-----|------|------|-----|-----|----|
| 880401 | 2343 23.30 | 37-42.19 | 15-11.54 | 3.05 | 23 | 135 | 36.3 | 0.53 | 1.6 | 2.5 | D1 |
| 880417 | 231 36.40 | 37-47.01 | 15-1.06 | 19.81 | 22 | 114 | 29.0 | 0.49 | 1.6 | 2.1 | C1 |
| 880417 | 1520 34.08 | 38-24.52 | 14-43.40 | 14.36 | 20 | 148 | 20.0 | 0.83 | 4.2 | 2.6 | D1 |
| 880528 | 557 35.47 | 38-19.89 | 14-49.25 | 20.41 | 28 | 71 | 14.6 | 0.48 | 1.5 | 1.8 | B1 |
| 880530 | 10 6 36.58 | 38-26.24 | 14-41.56 | 12.05 | 29 | 83 | 22.3 | 0.71 | 2.5 | 2.0 | C1 |
| 880605 | 12.43 7.12 | 38-26.59 | 14-40.13 | 12.55 | 48 | 79 | 19.5 | 0.82 | 1.8 | 1.5 | C1 |
| 880610 | 131 42.26 | 38-11.27 | 15-10.82 | 10.98 | 26 | 59 | 18.3 | 0.57 | 1.4 | 1.7 | C1 |
| 890425 | 1 8 40.04 | 37-59.47 | 14-5.98 | 10.02 | 29 | 66 | 6.4 | 0.76 | 2.1 | 1.6 | C1 |
| 890526 | 2219 17.28 | 38-10.01 | 15-8.26 | 13.84 | 43 | 65 | 15.5 | 0.61 | 1.2 | 1.0 | C1 |
| 890621 | 16.46 21.72 | 38-11.80 | 15-2.01 | 20.63 | 28 | 47 | 20.4 | 0.86 | 2.7 | 3.1 | C1 |
| 890624 | 234 19.11 | 37-51.04 | 14-43.67 | 12.79 | 33 | 87 | 9.4 | 0.85 | 2.1 | 2.0 | C1 |
| 890829 | 2246 11.76 | 38-17.58 | 15-39.93 | 9.00 | 27 | 89 | 4.8 | 0.46 | 1.2 | 1.2 | B1 |
| 890926 | 16.38 11.52 | 38-31.99 | 14-35.92 | 13.10 | 35 | 59 | 4.5 | 0.74 | 2.2 | 1.4 | C1 |
| 900218 | 028 46.76 | 38-7.04 | 15-8.81 | 20.65 | 52 | 76 | 10.1 | 0.51 | 0.9 | 1.3 | C1 |
| 900226 | 311 59.49 | 38-37.87 | 14-22.79 | 19.81 | 31 | 117 | 11.1 | 0.63 | 2.5 | 2.2 | C1 |
| 900328 | 547 31.47 | 38-10.83 | 14-56.24 | 23.60 | 42 | 26 | 24.3 | 0.88 | 2.0 | 2.2 | C1 |
| 900510 | 647 54.31 | 38-15.61 | 15-30.55 | 21.00 | 26 | 61 | 7.5 | 0.61 | 2.3 | 2.4 | C1 |
| 900915 | 311 1.42 | 38-7.99 | 15-50.81 | 16.56 | 28 | 103 | 4.3 | 0.48 | 1.5 | 1.3 | C1 |
| 901218 | 438 19.58 | 38-9.12 | 15-10.52 | 10.35 | 21 | 91 | 25.2 | 0.43 | 1.4 | 1.6 | C1 |
| 901218 | 1749 39.99 | 38-7.08 | 15-9.25 | 7.84 | 23 | 74 | 25.5 | 0.45 | 1.3 | 1.5 | C1 |
| 910924 | 0 4 10.98 | 37-41.04 | 14-53.73 | 28.38 | 29 | 93 | 22.9 | 0.64 | 2.1 | 1.8 | C1 |
| 910925 | 1321 33.98 | 38-1.81 | 15-59.79 | 15.10 | 25 | 175 | 6.9 | 0.54 | 2.3 | 2.3 | D1 |

TAB. 3 - Parametri ipocentrali ottenuti adottando il modello *OTHERMOD* (v. dettagli nella didascalia di Tab. 2).

| DATE | ORIGIN | LAT N | LAT E | DEPTH | NO | GAP | DMIN | RMS | ERH | ERZ | QM |
|--------|-------------|----------|----------|-------|----|-----|------|------|-----|-----|----|
| 880401 | 2343 22.64 | 37-42.10 | 15-11.15 | 1.23 | 23 | 135 | 36.4 | 0.47 | 1.2 | 3.4 | C1 |
| 880417 | 231 35.41 | 37-45.46 | 15-2.05 | 15.82 | 22 | 117 | 31.2 | 0.55 | 1.8 | 1.8 | C1 |
| 880417 | 1520 33.74 | 38-24.11 | 14-44.08 | 15.68 | 20 | 147 | 19.2 | 0.77 | 3.6 | 2.2 | D1 |
| 880528 | 557 35.22 | 38-18.71 | 14-49.59 | 17.71 | 28 | 69 | 15.1 | 0.51 | 1.6 | 1.4 | C1 |
| 880530 | 10 6 36.31 | 38-25.10 | 14-41.99 | 13.59 | 29 | 79 | 21.9 | 0.62 | 2.1 | 1.7 | C1 |
| 880605 | 1243 6.96 | 38-25.21 | 14-41.38 | 13.28 | 48 | 76 | 20.2 | 0.77 | 1.6 | 1.4 | C1 |
| 880610 | 131 41.92 | 38-10.87 | 15-10.32 | 10.77 | 26 | 61 | 17.4 | 0.59 | 1.5 | 2.2 | C1 |
| 890425 | 1 8 39.77 | 38-0.46 | 14-6.08 | 10.46 | 29 | 67 | 6.9 | 0.80 | 2.3 | 1.6 | C1 |
| 890526 | 2219 16.96 | 38-9.53 | 15-8.63 | 15.61 | 43 | 64 | 14.6 | 0.56 | 1.1 | 1.0 | C1 |
| 890621 | 1646 21.39 | 38-11.93 | 15-2.27 | 16.78 | 28 | 47 | 20.2 | 0.71 | 2.1 | 1.7 | C1 |
| 890624 | 234 18.43 | 37-49.96 | 14-44.98 | 9.00 | 33 | 90 | 11.9 | 0.82 | 1.7 | 2.1 | C1 |
| 890829 | 22.46 11.55 | 38-17.85 | 15-40.01 | 9.00 | 27 | 90 | 5.2 | 0.46 | 1.2 | 1.3 | B1 |
| 890926 | 1638 11.45 | 38-30.16 | 14-36.99 | 14.55 | 35 | 58 | 8.1 | 0.68 | 2.0 | 1.3 | C1 |
| 900218 | 028 46.43 | 38-7.28 | 15-8.68 | 18.01 | 52 | 75 | 10.5 | 0.59 | 1.0 | 1.5 | C1 |
| 900226 | 311 59.32 | 38-36.85 | 14-22.44 | 17.64 | 31 | 115 | 9.2 | 0.53 | 2.0 | 1.4 | C1 |
| 900328 | 547 31.24 | 38-10.40 | 14-56.60 | 19.81 | 42 | 26 | 23.4 | 0.87 | 1.9 | 2.4 | C1 |
| 900510 | 647 53.94 | 38-15.06 | 15-30.75 | 22.28 | 25 | 61 | 6.5 | 0.54 | 2.1 | 1.7 | C1 |
| 900915 | 311 1.04 | 38-8.27 | 15-51.33 | 17.19 | 28 | 101 | 4.2 | 0.46 | 1.5 | 0.7 | C1 |
| 901218 | 438 19.13 | 38-9.06 | 15-9.95 | 10.56 | 21 | 89 | 26.0 | 0.44 | 1.5 | 2.2 | C1 |
| 901218 | 1749 39.57 | 38-6.71 | 15-9.14 | 9.00 | 23 | 76 | 25.4 | 0.43 | 1.3 | 1.6 | C1 |
| 910924 | 0 4 10.91 | 37-41.03 | 14-55.51 | 24.42 | 29 | 90 | 20.8 | 0.66 | 2.1 | 2.1 | C1 |
| 910925 | 1321 33.71 | 38-2.16 | 15-59.37 | 15.41 | 25 | 167 | 7.0 | 0.56 | 2.3 | 1.1 | D1 |

TAB. 4 - Parametri di faglia determinati mediante il programma FPFIT ed il modello SOUTYR per gli eventi di Tab. 2

| DATA | T. ORIGINE | AZ. del DIP | DIP | RAKE |
|--------|-------------|-------------|-----|------|
| 880401 | 2343 23.30 | 150 | 30 | 70 |
| 880417 | 231 36.04 | 220 | 70 | 170 |
| 880417 | 1520 34.08 | 250 | 65 | 160 |
| 880528 | 557 35.47 | 150 | 75 | -100 |
| 880530 | 10 6 36.58 | 180 | 40 | -130 |
| 880605 | 1243 7.12 | 130 | 25 | 100 |
| 880610 | 131 42.26 | 270 | 5 | 160 |
| 890425 | 1 8 40.04 | 180 | 160 | -140 |
| 890526 | 22.19 17.28 | 185 | 55 | 80 |
| 890621 | 1646 21.72 | 75 | 25 | 160 |
| 890624 | 234 19.11 | 180 | 50 | -40 |
| 890829 | 2246 11.76 | 280 | 70 | 150 |
| 890926 | 1638 11.52 | 75 | 10 | -40 |
| 900218 | 2028 46.76 | 170 | 55 | -80 |
| 900226 | 311 59.49 | 130 | 65 | -120 |
| 900328 | 547 31.47 | 205 | 70 | -160 |
| 900510 | 647 54.31 | 215 | 40 | 30 |
| 900915 | 311 1.42 | 245 | 40 | -120 |
| 901218 | 438 19.58 | 270 | 85 | -160 |
| 901218 | 1749 39.99 | 150 | 65 | -70 |
| 910924 | 20 4 10.98 | 140 | 70 | 90 |
| 910925 | 1321 33.98 | 105 | 60 | -100 |

TAB. 5 - Parametri di faglia determinati mediante il programma FPFIT ed il modello OTHERMOD per gli eventi di Tab. 3

| DATA | T. ORIGINE | AZ. del DIP | DIP | RAKE |
|--------|-------------|-------------|-----|------|
| 880401 | 2343 22.64 | 125 | 65 | -70 |
| 880417 | 231 35.41 | 215 | 80 | -160 |
| 880417 | 1520 33.74 | 75 | 90 | -160 |
| 880528 | 557 35.22 | 170 | 45 | -40 |
| 880530 | 10 6 36.31 | 195 | 35 | -110 |
| 880605 | 1243 6.96 | 170 | 40 | -160 |
| 880610 | 131 41.92 | 210 | 85 | -80 |
| 890425 | 1 8 39.77 | 185 | 70 | -140 |
| 890526 | 2219 16.96 | 145 | 70 | 30 |
| 890621 | 1646 21.39 | 90 | 30 | -180 |
| 890624 | 234 18.43 | 100 | 30 | -110 |
| 890829 | 22.46 11.55 | 120 | 85 | -120 |
| 890926 | 1638 11.45 | 70 | 5 | -40 |
| 900218 | 028 46.43 | 175 | 55 | -70 |
| 900226 | 311 59.32 | 150 | 70 | -140 |
| 900328 | 0547 31.24 | 235 | 85 | -130 |
| 900510 | 0647 53.94 | 215 | 35 | -30 |
| 900915 | 0311 1.04 | 90 | 60 | -130 |
| 901218 | 0438 19.13 | 270 | 80 | -160 |
| 901218 | 1749 39.57 | 120 | 10 | -10 |
| 910924 | 004 10.91 | 150 | 85 | -80 |
| 910925 | 1321 33.71 | 250 | 35 | -140 |

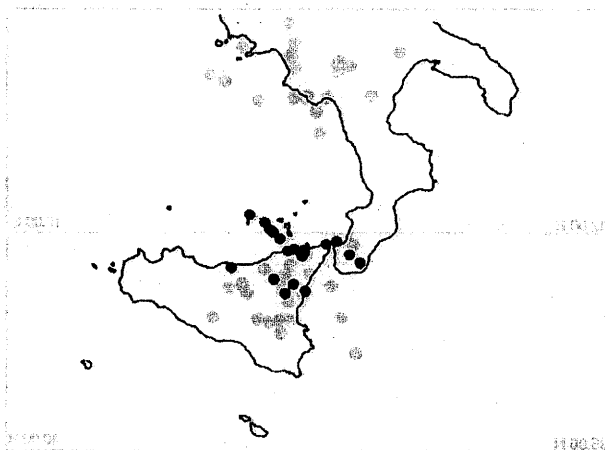


FIG. 1 - Mappa degli epicentri degli eventi riportati in Tab. 2, localizzati con il modello di velocità SOUTYR (Tab. 2).

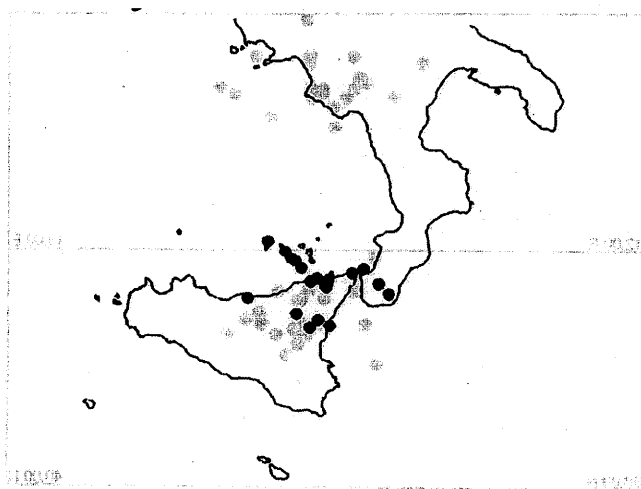


FIG. 2 - Mappa degli epicentri degli eventi riportati in Tab. 3, localizzati con il modello di velocità OTHERMOD (Tab. 1).

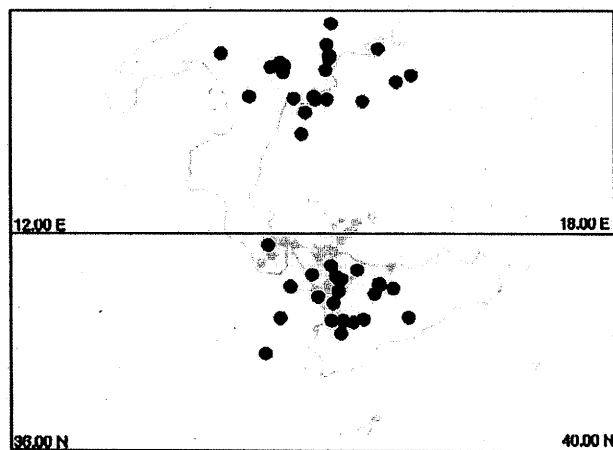


FIG. 3 - Sezioni verticali E-W e N-S relative all'intervallo di profondità 0-50 Km., con gli ipocentri degli eventi di Tab. 2, localizzati con il modello SOUTYR.

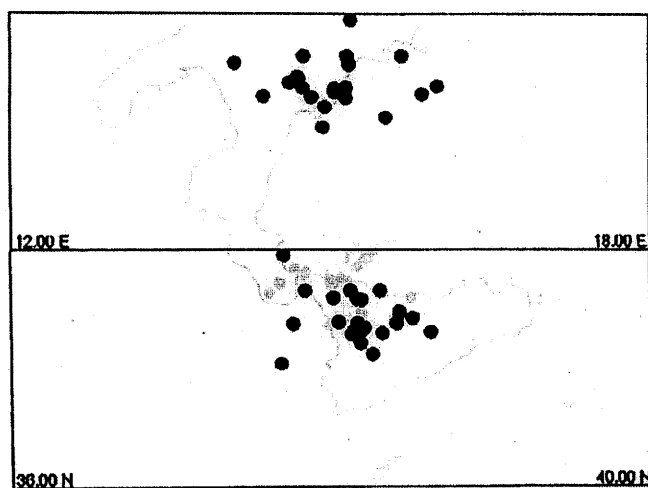


FIG. 4 - Sezioni verticali E-W e N-S relative all'intervallo di profondità 0-50 Km., con gli ipocentri degli eventi di Tab. 3, localizzati con il modello OTHERMOD.

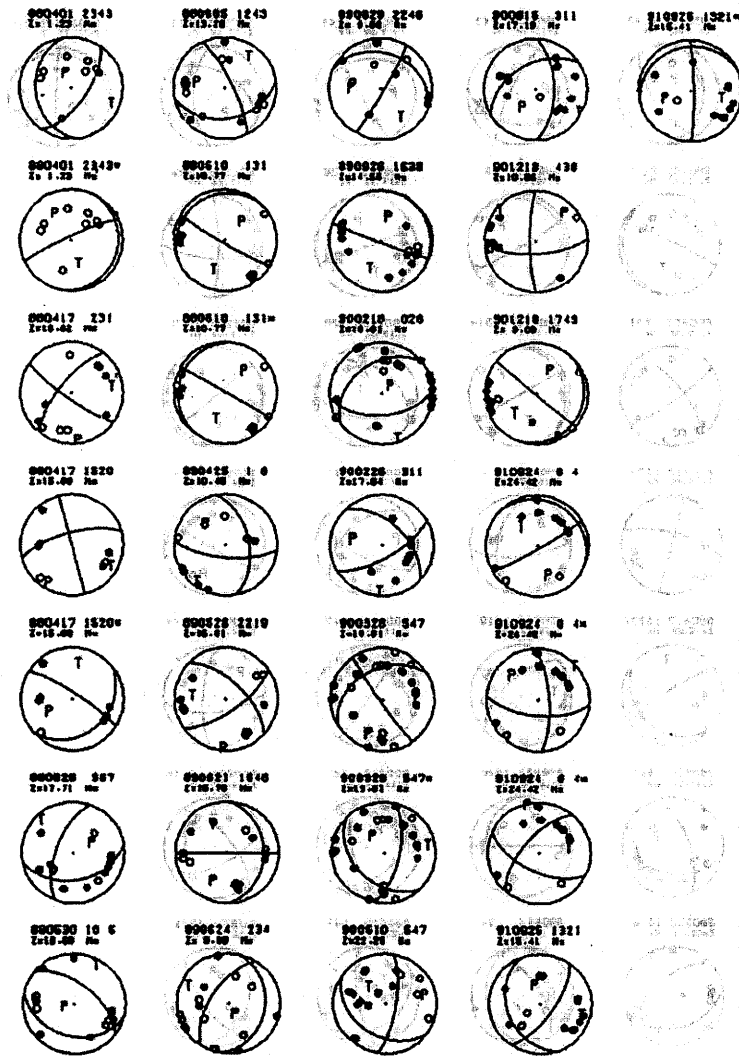


FIG. 5 - Meccanismi focali degli eventi di Tab. 2, determinati utilizzando il modello SOUTYR.

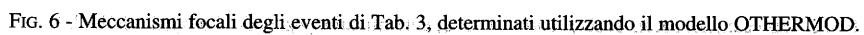


FIG. 6 - Meccanismi focali degli eventi di Tab. 3, determinati utilizzando il modello OTHERMOD.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è stato condotto con il supporto finanziario del contratto CNR-NGGTS n. 96.00347.CT02.

RIASSUNTO

È proposta una applicazione di alcune metodologie basate sulla teoria della dislocazione e sulle leggi di propagazione ondosa, al caso dei terremoti verificatisi tra il 1988 ed il 1991 nella Calabria Meridionale e Sicilia Nordorientale.

L'uso dei dati sperimentali dei tempi d'arrivo delle onde sismiche alle stazioni sismometriche ha consentito la localizzazione degli eventi, mentre le caratteristiche di radiazione-propagazione dei primi impulsi relativi alle onde longitudinali hanno reso possibile la definizione dei meccanismi di dislocazione.

I risultati sono stati posti a confronto con le conoscenze geodinamiche disponibili per l'area.

BIBLIOGRAFIA

- LEE, W.H.K., VALDES, C.M., HYPO71PC: *A personal computer version of the HYPO71 earthquake location program*. USGS Open-File Report, 85-749, 43 pp., 1985.
- NERI G., CACCAMO D., COCINA O., MONTALTO A., *Shallow earthquake features in the Southern Tyrrhenian region: geostructural and tectonic implications*, Boll. Geof. Teor. Appl., XXXIII, 129: 47-60, 1991.
- NERI, G., CACCAMO D., COCINA O., MONTALTO A., *Geodynamic implications of earthquake data in the Southern Tyrrhenian region*, In stampa sul Tectonophysics, 1995.
- REASENBERG P.A., OPPENHEIMER D., FPFIT, FPPLOT and FPPAGE, *Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault plane solutions*, USGS Open-File, 85, 739, 1985.